

不同水肥条件对玉米生长发育、产量及水分利用效率的影响

杨永辉^{1,2},武继承^{1,2},王洪庆³,郭庆³,何方^{1,2},韩伟锋^{1,2},潘晓莹^{1,2}
(1. 河南省农业科学院 植物营养与资源环境研究所,河南 郑州 450002; 2. 农业部作物高效用水原阳科学观测站,河南 原阳 453514; 3. 西华县农业科学研究所,河南 西华 466600)

摘要: 采用田间试验,研究了不同灌水量(300、600、900 m³/hm²)与施氮量(0、120、240、360 kg/hm²)对玉米生长、产量及水分利用效率的影响,旨在为玉米的水肥管理提供科学依据。结果表明,随土层的加深,土壤水分含量明显降低,适量施用氮肥可有效减少玉米对水分的消耗,尤其是灌水量300 m³/hm²+施氮量240 kg/hm²处理。从小喇叭口期开始,在相同灌水量条件下,随施氮量的增加,玉米地上部分干质量、株高及可见叶片数总体上均增加,且玉米产量也显著提高,而水分利用效率随施氮量的增加表现为先增后降的趋势。在不同水肥处理中,产量以灌水量900 m³/hm²+施氮量360 kg/hm²处理最高,较其对应的不施氮肥处理提高54.5%;水分利用效率以灌水量300 m³/hm²+施氮量240 kg/hm²处理最高,较其对应的不施氮肥处理提高62.5%。综合考虑,以灌水量600 m³/hm²+施氮量240 kg/hm²处理增产节水效果较佳。

关键词: 水分; 养分; 玉米; 产量; 水分利用效率

中图分类号: S513;S275.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-3268(2015)11-0050-05

Effects of Different Water and Fertilizer Conditions on Growth and Water Use Efficiency of Maize

YANG Yonghui^{1,2}, WU Jicheng^{1,2}, WANG Hongqing³,
GUO Qing³, HE Fang^{1,2}, HAN Weifeng^{1,2}, PAN Xiaoying^{1,2}
(1. Institute of Plant Nutrient, Resource and Environment, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China; 2. Yuanyang Experimental Station of Crop Water Use, Ministry of Agriculture, Yuanyang 453514, China; 3. Xihua Institute of Agricultural Sciences, Xihua 466600, China)

Abstract: A field experiment was conducted to investigate the effects of different irrigation amount (300 m³/ha, 600 m³/ha, 900 m³/ha) and nitrogen application amount (0 kg/ha, 120 kg/ha, 240 kg/ha, 360 kg/ha) on maize growth, yield and water use efficiency, so as to provide scientific basis for management of water and fertilizer for maize. The results indicated that with the increase of the soil depth, the soil moisture decreased obviously, the right amount of nitrogen fertilizer could effectively reduce the water consumption of maize, especially the treatment with irrigation amount of 300 m³/ha + nitrogen amount of 240 kg/ha. From pre-tasselling stage, under the same irrigation condition, with the increase of nitrogen fertilizer application amount, maize aboveground dry weight, plant height and visible leaf number increased generally, and the yield of maize increased significantly, while the water use efficiency first increased and then decreased. Among all treatments, the yield of treatment with irrigation amount of 900 m³/ha + nitrogen amount of 360 kg/ha was the highest, which increased by 54.5% compared with

收稿日期:2015-04-20
基金项目:国家863计划项目(2013AA102904);公益性行业(农业)科研专项(201203077);国家科技支撑计划项目(2013BAD07B07);国家自然科学基金项目(U1404404);河南省农业科学院自主创新专项基金项目
作者简介:杨永辉(1978-),男,陕西西安人,副研究员,博士,主要从事土壤生态与节水农业方面的研究。
E-mail: yangyongh@mails.ucas.ac

the control without nitrogen fertilizer, and water use efficiency of the treatment with irrigation amount of $300 \text{ m}^3/\text{ha}$ + nitrogen amount of $240 \text{ kg}/\text{ha}$ was the highest, which increased by 62.5% compared with the control without nitrogen fertilizer. Overall, the treatment with irrigation amount of $600 \text{ m}^3/\text{ha}$ + nitrogen amount of $240 \text{ kg}/\text{ha}$ had better effect for increasing production and saving water.

Key words: moisture; nutrient; maize; yield; water use efficiency

水分与养分亏缺均会对作物生长产生不利影响。水和肥既相互促进又互相制约^[1-3]。水分不足会影响作物营养物质的合成与转运,降低作物产量与品质,而肥力不足则会影响作物对水分的吸收与利用。适量的氮肥能够提高作物叶片光合机构的活性,增加干物质的积累,增强作物对干旱环境的适应能力^[4-6]。而氮素缺乏能够影响作物生理代谢过程^[7-9],最终影响作物产量。水和肥共同作用既可能促进作物产量的提高,也可能使其降低^[10]。只有水肥供应协调、合理,才更能发挥二者的协同互作效果,从而表现出更显著的增产作用^[11],即耦合效应,这时水、肥才能得到高效利用。大量研究表明,在特定条件下,施肥能够促进作物水分利用效率显著提高^[12-14]。东先旺等^[15]研究表明,施肥能够提高作物水分利用效率,促进作物产量的提高。在旱地条件下施肥均可促使植物吸收利用更多的土壤水分^[16],而 Porver^[17]的研究结果相反。在小麦—玉米轮作体系中,氮肥超量施用现象十分普遍,导致氮肥利用率较低,且氮肥施用量导致地下水污染,从而影响了生态环境。杨永辉等^[18]研究表明,在天然降水条件下,增施氮肥可有效提高玉米水分利用效率,但氮肥用量不宜过高。在玉米关键生育时期如果出现间歇性干旱会影响玉米前期的生长和后期有机物质向籽粒中的转化,最终影响玉米产量。因此,在玉米关键生育时期进行适时的补灌与合理追肥,以促进水肥互作,对于提高玉米对水分与养分的吸收利用具有重要意义。但有关该方面的研究还鲜见报道。为此,探讨了不同水肥互作对玉米生长、产量和水分利用的影响,旨在为玉米的水肥管理提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

试验在西华县农业科学研究所试验地进行,该地区位于 $114^{\circ}33'E$ 、 $33^{\circ}43'N$,海拔 51.8 m ,年降水量 747.4 mm ,其中 50% 以上集中在夏季,冬、春季易旱,夏、秋季易涝,旱涝交错。该地区地势平坦,土壤类型为砂壤质潮土,土壤容重为 $1.45 \text{ g}/\text{cm}^3$,肥力均匀,耕层土壤含有机质 $11.7 \text{ g}/\text{kg}$ 、全氮 $0.82 \text{ g}/\text{kg}$ 、水解氮 $79.31 \text{ mg}/\text{kg}$ 、速效磷 $9.51 \text{ mg}/\text{kg}$ 、速效钾 $51.23 \text{ mg}/\text{kg}$ 。前茬作物为小麦。土壤机械组成为:砂粒($2 \sim 0.02 \text{ mm}$)占 57.6%,粉粒($0.02 \sim 0.002 \text{ mm}$)占 29.1%,黏粒($<0.002 \text{ mm}$)占 13.3%。

1.2 试验设计

以灌水量为主区,施氮量为副区;设置 4 个施氮(N)量: $0 \text{ kg}/\text{hm}^2$ (N_0)、 $120 \text{ kg}/\text{hm}^2$ (N_1)、 $240 \text{ kg}/\text{hm}^2$ (N_2)、 $360 \text{ kg}/\text{hm}^2$ (N_3),设置 3 个总灌水量: $300 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ (W_1)、 $600 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ (W_2)、 $900 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ (W_3),共 12 个处理,即处理 1: W_1N_0 ,处理 2: W_1N_1 ,处理 3: W_1N_2 ,处理 4: W_1N_3 ,处理 5: W_2N_0 ,处理 6: W_2N_1 ,处理 7: W_2N_2 ,处理 8: W_2N_3 ,处理 9: W_3N_0 ,处理 10: W_3N_1 ,处理 11: W_3N_2 ,处理 12: W_3N_3 。供试玉米品种为郑单 958,于 2013 年 6 月 8 日播种,播种前(6 月 6 日)开沟底施过磷酸钙(P_2O_5 , $105 \text{ kg}/\text{hm}^2$)、氯化钾(K_2O , $135 \text{ kg}/\text{hm}^2$)和 1/3 氮肥。6 月 20 日定苗,6 月 25 日喷施玉米苗期专用除草剂,7 月 17 日(小喇叭口期)和 8 月 25 日(灌浆期)分别追施 1/3 氮肥,并按 1/2 总灌水量进行灌水。玉米株距 25 cm 、行距 60 cm ,小区面积 30 m^2 。每个处理 3 次重复,随机区组排列。于 2013 年 9 月 23 日收获。玉米全生育期内降雨 335.7 mm 。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 土壤含水量 在玉米收获后(9 月 23 日),在不同处理随机取 3 点,采用土钻分别采集 $0 \sim 20$ 、 $20 \sim 40$ 、 $40 \sim 60$ 、 $60 \sim 80$ 、 $80 \sim 100 \text{ cm}$ 土层土壤,然后采用烘干法测定其含水量。

1.3.2 玉米全生育期耗水量 玉米全生育期耗水量计算公式为:玉米全生育期耗水量 = 播种前 $0 \sim 100 \text{ cm}$ 土层土壤含水量 + 玉米生育期内降雨量 + 玉米生育期内灌水量 - 收获时 $0 \sim 100 \text{ cm}$ 土层土壤含水量。

1.3.3 玉米生长发育相关指标 分别于苗期(6 月 20 日)、小喇叭口期(7 月 17 日)、大喇叭口期(7 月 25 日)、灌浆期(8 月 25 日)和收获期(9 月 23 日),在每个小区选取具有代表性的 5 株植株,测量玉米可见叶片数和株高,株高用最小刻度为 1 mm 的直尺测量;每个小区选取 2 株植株,取地上部,带回室内,放入烘箱,于 105°C 下进行杀青 $0.5 \sim 2.0 \text{ h}$,然后于 $75 \sim 80^{\circ}\text{C}$ 烘干至恒质量,用感量为 0.01 g 的电子天平称量地上部分干质量。

1.3.4 产量及其构成要素 玉米收获时测定玉米产量构成要素,并以每小区产量记产,折合成每公顷产量。

1.3.5 水分利用效率 水分利用效率计算公式为:水分利用效率 = 玉米籽粒产量/玉米全生育期耗水量。

1.4 数据处理

试验结果均为 3 次重复的算术平均值,且所得的数据应用数理统计软件(DPS)进行处理,并采用 LSD 法进行多重比较和显著性检验。

2 结果与分析

2.1 不同水肥处理对土壤含水率及玉米耗水量的影响

由图 1 可知,在玉米收获后,随土层加深,土壤含水率总体上表现为逐渐降低再趋于平缓的趋势,这可能是因为小麦根系吸收利用了更多的下层水分所致。而 W2N0 和 W3N2 处理 0~100 cm 土层土壤含水率波动较大,随土层的加深表现为先降低再增加再降低再增加的趋势。在 0~20 cm 土层中,土壤含水率以 W2N0 处理最高,其次为 W1N3 处理,以 W3N1 处理最低。在 20~40 cm 土层,土壤含水率以 W1N2 处理最高,W2N0 处理最低。在 40~60 cm 土层,各处理土壤含水率总体均随土层加深明显降低。到 60~80 cm 土层,土壤含水率以 W1N3 处理

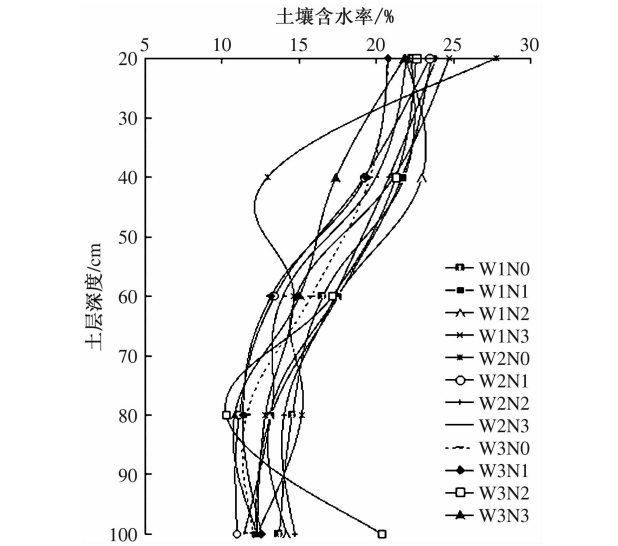
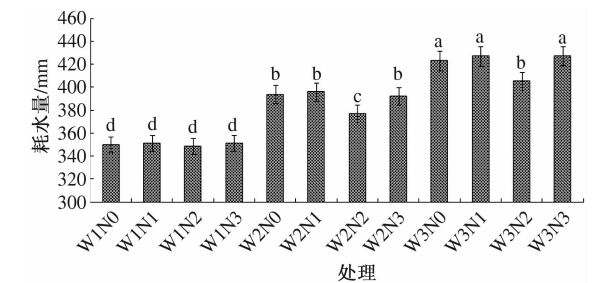


图 1 不同水肥处理对土壤含水率的影响

最高,其次为 W1N0 和 W2N2 处理,W3N2 处理最低。到 80~100 cm 土层,W3N2 处理的土壤含水率急剧提高,其他处理土壤含水率总体趋于平稳。

由图 2 可知,随灌水量增加,玉米耗水量也显著增加,尤其是 W3N3 处理,但相同灌水条件下,N2 处理的耗水量最低,明显低于其他施氮量处理,其中 W2、W3 条件下差异显著。可能是因为施氮量适中时能够促进玉米对水分的吸收,减少无效蒸腾和土面蒸发,从而有利于水分利用潜力的提高。



不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05),下同

图 2 不同水肥处理对玉米耗水量的影响

2.2 不同水肥处理对玉米生长的影响

由表 1 可知,从小喇叭口期开始,相同水分条件下,随氮肥用量的增加,玉米株高、可见叶片数、地上部分干质量均总体增加。苗期,不同水肥处理对玉米可见叶片数和地上部分干质量影响较小,而对玉米株高影响较大,以 W2N2 处理的株高最高,其次为 W3N2 处理,其他处理的株高均低于 15 cm。到小喇叭口期,不同水肥处理的株高、可见叶片数均显著高于 W1N0、W2N0、W3N0 处理,其他处理之间差异不显著;地上部分干质量以 W2N3 和 W3N3 处理较高,显著高于其他处理,W1N0、W2N0、W3N0 处理较低。到大喇叭口期,总体仍以 W3N3、W2N3 处理的株高、可见叶片数及地上部分干质量高于其他处理。到灌浆期,各处理的株高及可见叶片数差异较小,均以 W1N0 处理最小;地上部分干质量仍以 W3N3 处

表 1 不同水肥处理对玉米生长的影响

处理	苗期			小喇叭口期			大喇叭口期			灌浆期			收获期	
	株高 /cm	可见叶片 数/片	地上部分干 质量/(g/株)	株高 /cm	可见叶片 数/片	地上部分干 质量/(g/株)	株高 /cm	可见叶片 数/片	地上部分干 质量/(g/株)	株高 /cm	可见叶片 数/片	地上部分干 质量/(g/株)	株高 /cm	地上部分干 质量/(g/株)
W1N0	14.5b	4.3a	0.25a	82.5b	12.1b	20.1f	118.4f	14.2e	41.3i	223.5e	19.0b	152.0i	235.7g	212.0g
W1N1	13.6c	4.2a	0.24a	88.7a	13.2a	31.4c	135.4d	16.0e	60.4g	234.6b	20.0a	205.3g	244.6e	295.4e
W1N2	13.6c	4.2a	0.24a	89.7a	13.4a	33.5b	148.7bc	16.9bc	64.5f	238.4a	20.0a	224.6f	253.5d	310.2d
W1N3	13.5c	4.2a	0.24a	88.9a	13.2a	33.6b	152.6b	17.4ab	71.5d	238.8a	20.0a	254.8b	259.7bc	328.0c
W2N0	13.7c	4.2a	0.24a	82.6b	12.4b	21.8e	121.5e	14.7e	44.5h	224.4c	20.0a	158.5g	240.2f	229.6f
W2N1	14.7ab	4.3a	0.24a	88.5a	13.7a	32.0c	142.3c	16.3c	68.6e	236.1a	20.0a	230.9e	251.3d	313.0d
W2N2	15.6a	4.4a	0.26a	88.6a	13.6a	34.5b	155.1b	17.1ab	75.2c	239.0a	20.0a	238.4d	255.4ed	322.6c
W2N3	14.8ab	4.3a	0.25a	89.7a	13.8a	36.7a	158.4ab	17.8a	78.3b	238.8a	20.0a	258.9b	261.5ab	339.6b
W3N0	14.4b	4.3a	0.25a	82.2b	12.0b	20.0f	125.6e	15.4d	44.8h	224.4c	20.0a	161.3h	244.2e	232.0c
W3N1	14.2b	4.2a	0.24a	87.7a	13.5a	30.5d	144.9c	16.5c	71.5d	236.3a	20.0a	244.6c	256.3c	300.7e
W3N2	15.4a	4.3a	0.25a	89.0a	13.4a	33.8b	154.7b	17.4ab	78.6b	238.6a	20.0a	257.1b	258.9bc	346.1b
W3N3	14.8ab	4.2a	0.25a	89.9a	13.6a	36.9a	162.3a	18.0a	82.7a	238.9a	20.0a	263.3a	264.7a	372.5a

注:同列不同字母表示差异显著(P<0.05),下同。

理最高,其次为 W2N3 处理。到收获期,仍然以 W2N3 和 W3N3 处理的株高和地上部分干质量高于其他处理。综上,随施氮量的增加,玉米株高、可见叶片数、地上部分干质量均总体增加,尤其是在灌水量 900 m³/hm²、600 m³/hm² 时效果更为显著。

2.3 不同水肥处理对玉米产量构成要素的影响

由表 2 可知,在相同灌水条件下,随施氮量增加,各产量构成要素总体均增加,而秃尖长度明显降低。不同水肥处理中,以 W3N3 处理的穗长、穗粗、

穗行数及轴粗最高,其次为 W2N3 和 W1N3 处理,均显著高于不施氮肥处理;出籽率和百粒质量以 W3N2 处理最高,其次为 W3N3 处理,两处理间差异不显著,但均显著高于不施氮肥处理;行粒数以 W1N3 处理最高,其次是 W3N3、W2N3 处理,三处理间差异不显著,但均显著高于不施氮肥处理。综上,高水肥有利于提高产量构成要素,降低秃尖,进而有利于提高玉米增产潜力。

表 2 不同水肥处理对玉米产量构成要素的影响

处理	穗长/cm	穗粗/cm	秃尖长度/cm	穗行数	行粒数	轴粗/cm	出籽率/%	百粒质量/g
W1N0	14.4e	4.2c	2.1b	12.6d	30.4d	2.80b	84.7c	25.1c
W1N1	15.0d	4.4bc	1.8b	13.6c	32.6c	2.84b	86.0b	28.5b
W1N2	16.8b	4.7bc	1.1c	13.6c	34.8b	2.94b	86.9b	29.8b
W1N3	17.0b	5.0a	0.8c	14.8b	36.6a	2.90b	86.2b	28.9b
W2N0	14.5e	4.5bc	1.8b	12.8d	31.3d	2.78b	84.9c	26.7c
W2N1	15.8c	4.8ab	1.0c	13.9bc	34.2b	2.70b	86.3b	28.9b
W2N2	16.8b	4.8ab	0.5d	14.6b	35.8a	2.86b	85.9b	29.7b
W2N3	17.1b	5.2a	0.1e	15.4a	36.0a	2.82b	86.6b	30.6b
W3N0	15.2cd	4.7ab	2.8a	13.6c	30.4d	2.70b	83.6d	25.1c
W3N1	15.9c	4.8ab	1.9b	14.2b	32.6c	2.84b	86.2b	29.0b
W3N2	16.3bc	4.9a	0.2e	15.6a	34.0b	2.89b	87.7a	32.8a
W3N3	19.9a	5.4a	0e	16.0a	36.2a	3.21a	87.5a	31.2a

2.4 不同水肥处理对玉米产量及水分利用效率的影响

由图 3 可知,相同灌水条件下,随施氮量的增加,玉米产量增加,而水分利用效率表现为先增加后降低的趋势;相同施氮量条件下,玉米产量随灌水量的增加而增加,而水分利用效率表现为降低的趋势。各处理中,产量以 W3N3 处理最高,W3N2、W2N3、W2N2 处理次之,均显著高于不施氮肥处理,分别较各自对应的不施氮肥处理显著提高 54.5%、

49.3%、63.0%;水分利用效率以 W1N2 处理最高,W1N3、W2N2 处理次之,三处理间差异不显著,均显著高于不施氮肥处理,分别较各自对应的不施氮肥处理显著提高 62.5%、60.2%、64.8%。说明,施用氮肥可以显著提高玉米产量和水分利用效率,高水肥有利于玉米产量的提高,而在灌水量较低且施氮量适中时(W1N2)更利于水分利用效率的提高。但综合考虑,以 W2N2 处理增产节水效果较佳。

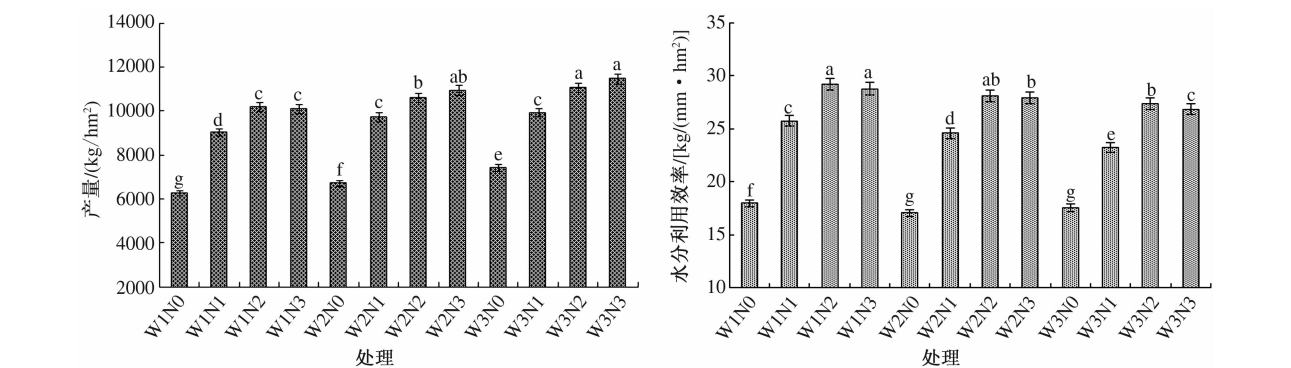


图 3 不同水肥处理对玉米产量和水分利用效率的影响

3 结论与讨论

施肥有明显的调水作用,而灌水也有调肥增产的作用^[18-22],其增产作用是以提高水分利用效率为基础的^[23-24]。在干旱条件下,施肥可促使植物吸收利用更多的水分^[16],尤其施用氮、磷肥^[25]。在正常供水条件下,缺氮会造成植物光合速率、光合量子效

率和有关碳代谢酶类活性的降低^[26]。但过多的氮肥会随降水或灌水过程淋溶到下层土壤,甚至污染地下水。而实行水肥一体化可使养分与水分供应更加同步,利于作物对养分和水分的吸收与利用,减少水分和养分的流失,有利于水肥利用率的提高。因此,在玉米关键生育时期进行适时补灌与追肥,能够改善玉米对水肥的需求,改善或缓解水肥供应与玉

米需求的矛盾,促进玉米对水肥的吸收与利用。本研究发现,适量追施氮肥和灌水可有效减少玉米对水分的消耗,尤其是灌水量 300 m³/hm² + 施氮量 240 kg/hm² 处理,这可能是因为适量灌水和施肥改善了玉米地上、地下部分的形态结构,促进了玉米对水分的利用。

在玉米生长期,雨热同季,但由于该时期温度较高而导致蒸发量较大,因此在不同的生长阶段仍存在一定水分胁迫,需要进行一定量的补灌和追肥才能满足玉米生长过程中对水分和养分的需求,促进其生长,进而提高产量。本研究发现,灌水量 900 m³/hm² + 施氮量 360 kg/hm² 处理更有利于提高穗长、穗粗及穗行数,但其全生育期的耗水量较大。同时,施用氮肥可显著提高玉米产量,但随灌水量和施氮量的增加,其水分利用效率有所降低。有研究表明,在不灌水条件下,取得高产的施氮量较高,达 450 kg/hm²^[18]。而在本研究的灌水条件下,得到高产的施氮量较低(360 kg/hm²),说明灌水更利于发挥养分的作用,促进作物对养分的吸收,提高玉米产量。而在不同水肥处理中,以灌水量 300 m³/hm² + 施氮量 240 kg/hm² 处理的水分利用效率提高幅度更大,较 W1N0 处理提高了 62.5%。

综上所述,在河南省潮土区玉米小喇叭口期和灌浆期分别补灌 300 m³/hm²,底施氮 80 kg/hm² + 小喇叭口期追施氮 80 kg/hm² + 灌浆期追施纯氮 80 kg/hm² 的水肥管理模式的增产节水效果较佳。

参考文献:

[1] 金轲,汪德水,蔡典雄,等. 水肥耦合效应研究 I. 不同降雨年型对 N、P 水配合效应的影响[J]. 植物营养与肥料学报,1999,5(1):2-8,46.

[2] 腾云,郭亚芬,张忠学,等. 东北半干旱区大豆水肥耦合模式试验研究[J]. 东北农业大学学报,2005,36(5):640-641.

[3] Benbi D K. Efficiency of nitrogen use by dryland wheat in a subhumid region in relation to optimizing the amount of available water[J]. Journal of Agricultural Science,1989,115(1):7-10.

[4] Chaves M M, Maroco J P, Pereira J S. Understanding plant responses to drought-from genes to the whole plant[J]. Functional Plant Biology,2003,30(3):239-264.

[5] Hébert Y, Guingo E, Loudet O. The response of root/shoot partitioning and root morphology to light reduction in maize genotypes[J]. Crop Science,2001,41(2):363-371.

[6] Shanguan Z P, Shao M, Ren S J, et al. Effect of nitrogen on root and shoot relations and gas exchange in winter wheat[J]. Botanical Bulletin of Academia Sinica,2004,45(1):49-54.

[7] Ciompi S, Gentili E, Guidi L, et al. The effect of Nitrogen deficiency on leaf gas exchange and chlorophyll fluorescence parameters in sunflower[J]. Plant Science,1996,

118(2):177-184

[8] 张福锁,李春俭,米国华. 植物营养生理进展[M]//洪德元. 21 世纪的生命科学展望. 济南:山东教育出版社,2003:206-235.

[9] McDonald A J S, Davies W J. Keeping in touch:Response of the whole plant to deficit s in water and nit rogen supply[J]. Advances Botanic Research,1996,22:229-300.

[10] 杜建军,田霄鸿,王朝辉,等. 根系吸收水分和养分的作用及以肥促根的效应[M]//汪德水. 旱地农田肥水关系原理及调控技术. 北京:中国农业科技出版社,1995:106-110.

[11] 于亚军,李军,贾志宽,等. 旱作农田水肥耦合研究进展[J]. 干旱地区农业研究,2005,23(3):220-224.

[12] 张仁陟,李小刚,胡恒觉. 施肥对提高旱地农田水分利用效率的机理[J]. 植物营养与肥料学报,1999,5(3):221-226.

[13] 谷洁,刘存寿,方日尧. 半湿润偏旱区施肥对冬小麦水分利用效率和产量的影响[J]. 西北农业学报,1997,6(4):62-64.

[14] 尹光华,刘作新,李桂芳,等. 水肥耦合对春小麦水分利用效率的影响[J]. 水土保持学报,2004,18(6):156-158,162.

[15] 东先旺,刘树堂,陶世荣. 不同肥水组合对夏玉米水分利用效率及经济效益的影响[J]. 华北农学报,2000,15(1):81-85.

[16] Brown P J. Water use and soil water deletion by dryland wheat as affected by nitrogen fertilization [J]. Agron J, 1971,63(1):43-46.

[17] Porver J F. Soil management for efficient water use soil fertility [M]//Taylor H M. Limitation to efficient water use in crop production. USA: ASA-CSSA-SSSA, 1983: 87-113.

[18] 杨永辉,武继承,王洪庆,等. 氮肥施用量对砂壤质潮土玉米生长及水分利用效率的影响[J]. 河南农业科学,2013,42(10):55-58,69.

[19] 田德龙,史海滨,薛铸. 盐渍化土壤水肥耦合对向日葵叶水势的影响[J]. 中国农村水利水电,2010(12):35-37,41.

[20] 李楠楠,张忠学. 黑龙江半干旱区玉米膜下滴灌水肥耦合效应试验研究[J]. 中国农村水利水电,2010(6):88-90,94.

[21] 梁运江,依艳丽,许广波,等. 水肥耦合效应对辣椒植株生长发育的影响[J]. 中国农村水利水电,2009(4):42-45.

[22] 梁运江,许广波,依艳丽,等. 水肥耦合效应对保护地辣椒果实中硝态氮含量的影响[J]. 节水灌溉,2010(10):53-55.

[23] 滕云,刘淑艳,于振良,等. 黑土区玉米膜下坐水施肥耦合对产量的影响[J]. 节水灌溉,2009(9):24-26,29.

[24] 杜建军,李生秀,高亚军,等. 氮肥对冬小麦抗旱适应性及水分利用的影响[J]. 西北农业大学学报,1999,27(5):1-5.

[25] 汪德水,程宪国,张美荣,等. 旱地土壤中的肥水激励机制[J]. 植物营养与肥料学报,1995,1(1):64-70.

[26] 李全起,陈雨海,房全孝. 夏玉米种植中水分问题的研究进展[J]. 玉米科学,2004,12(1):72-75.